BETONSZILÁRDSÁG

Nyomószilárdság vizsgálat roncsolásos módszerrel

A nyomás a szilárdságtan egyszerű igénybevételeinek egyike. A nyomás okozta törőfeszültséget nyomószilárdságnak nevezzük.

Az anyag nyomási törőfeszültségét nyomószilárdság vizsgálattal határozzuk meg, ennek eredménye annál jobb közelítését adja az elméleti törőfeszültségnek, mennél pontosabb a nyomószilárdság vizsgálat végrehajtása.

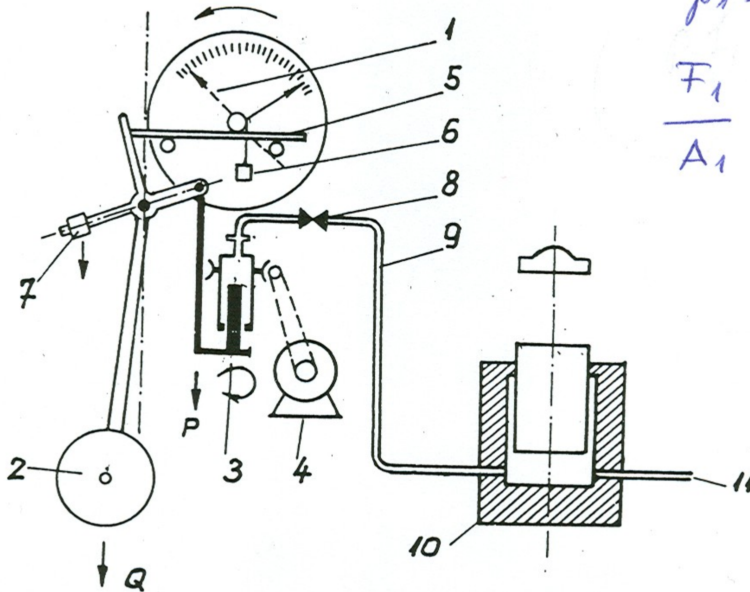
A beton nyomószilárdsága vizsgálatának pontosságát, illetve a vizsgálat eredményének megbízhatóságát befolyásoló főbb tényezők a következők (*Palotás – Balázs*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. 1980):

– a próbatest mérete, alakja és víztartalma;
– a beton legnagyobb szemnagysága;
– a próbatest utókezelésének módja;
– a nyomószilárdság vizsgáló berendezés rendszere és pontossága;
– a próbatest elhelyezkedése a szilárdság vizsgáló gépben;
– a terhelő erő növekedésének sebessége;
– a próbatest nyomott felülete és a vizsgálóberendezés csiszolt nyomólapjai, amelyek egyike a gömbcsukló része, illetve azoknak megfelelő minőségű, a nyomólapok kímélése érdekében alkalmazott alátétlemezek közötti tapadási súrlódás;
– a gömbcsukló kialakítása;
– a beton kora.

A 45. ábrán egy hidraulikus préshez (nyomógéphez) csatolt ingás dinamométer vázlatát mutatjuk be. Az ábra a dinamométert a számlap mögül nézve ábrázolja (elől-ről nézve a mutató az erő növekedésekor az óramutatóval egyirányban mozog).

A dinamométer 3-jelü meghajtó hidraulikájának hengerét (surlódáscsökkentés érdekében) a 4-jelü motor forgatja. Az 1-jelü mutató tengelyére felékelt fogaskereket és az 5-jelü fogaslécet a 6-jelü zsinóron függő - suly fesziti holtjátékmentesen csatlakozás céljából. Az ingát a 7-jelü ellensullyal lehet kiegyensulyozni (nullázás). A csillapitást a 8-jelü tökéletlenül záró visszacsapószelep biztositja.

A munkahenger nyomását a 9-jelü vezeték közvetiti. A 10-jelü munkahengerben a mozgó dugattyut nullázáskor olajnyomással megemeljük. A szivattyu és a munkahenger közti vezeték jele: 11.



$p_1 = p_2$ nyomás

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

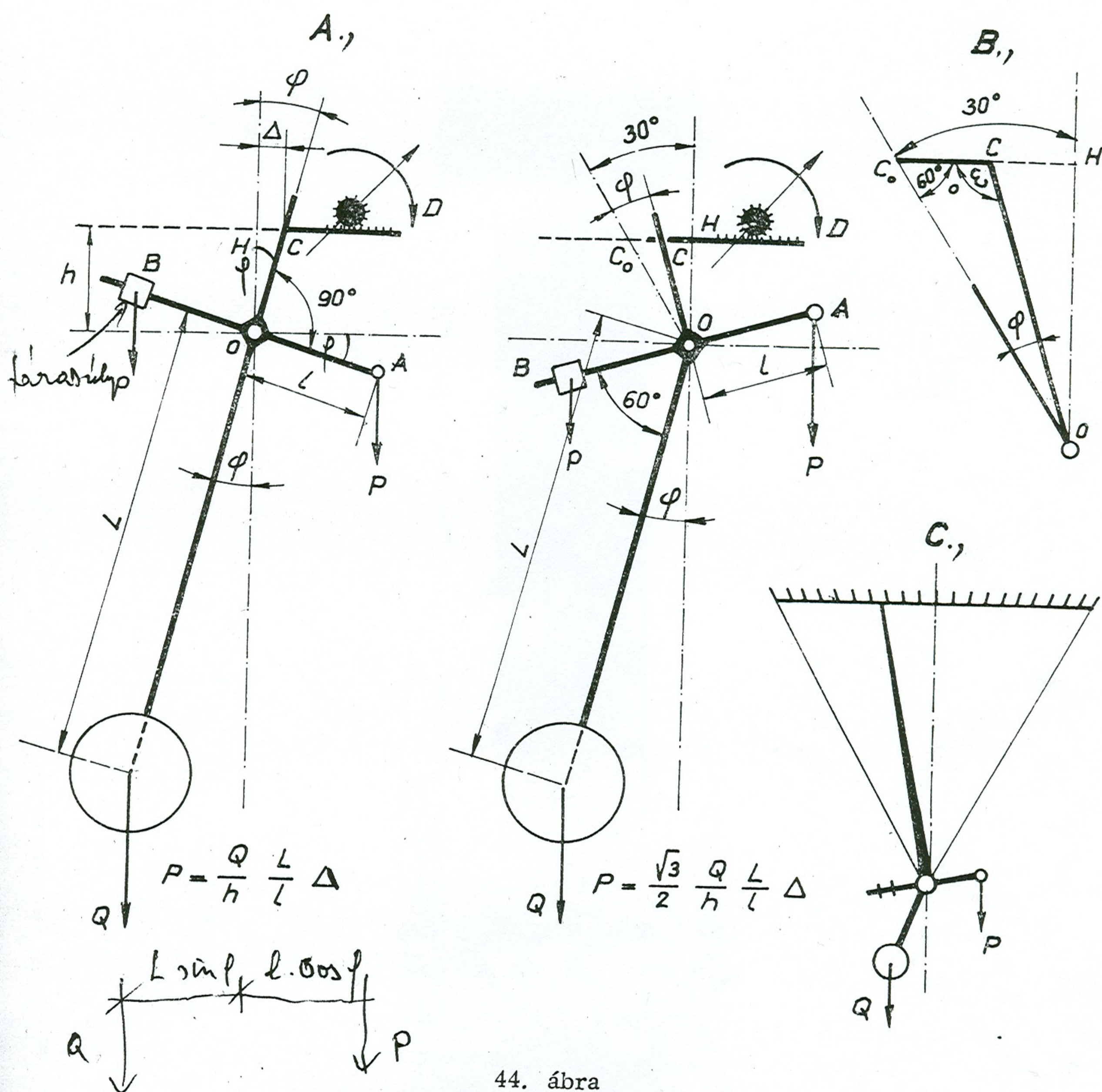
azaz

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

F = erő
A = felület

45. ábra
Hidraulikus prés ingás dinamométerének vázlata
1 - mutató; 2 - inga; 3 - ingát meghajtó hidraulika; 4 - meghajtó hidraulika hengerét forgató motor; 5 - fogasléc; 6 - mutató fogaskerék feszitő sulyocska; 7 - nullázó ellensuly; 8 - visszacsapószelep; 9 - olajvezeték; 10 - munkahenger; 11 - olajvezeték

Forrás: Weiss György: „Építőipari laboratóriumi méréstechnika és műszerismeret. II. kötet. ÉTK Budapest, 1974.



44. ábra

Kiegyenlitett ingás dinamométerek vázlata

a) 90°-os inga; B) 60°-os inga; C) Dobourdien-féle ingás dinamométer

$$\frac{\Delta}{h} = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}$$

constans

$$P = \frac{QL}{l} \cdot \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \left(\frac{QL}{l}\right) \cdot \frac{\Delta}{h}$$

Forrás: Weiss György: „Építőipari laboratóriumi méréstechnika és műszerismeret. II. kötet. ÉTK Budapest, 1974.

Terhelési sebesség

Beton nyomószilárdság vizsgálat esetén az *MSZ 4719:1982* visszavont szabvány szerint a terhelő (nyomó) erőt úgy kell fokozni, hogy a nyomófeszültség

$0,5 \pm 0,1$ N/mm^2/sec sebességgel növekedjék.

Így például egy 30 N/mm^2 nyomószilárdságú 150 mm élhosszúságú próbakockát átlagban 30/0,5 = 60 sec = 1 perc alatt kell eltörni, amikor is a terhelőerő növekedés sebessége:

$$30 \times 150 \times 150/60 = 11,25 \text{ kN/sec}$$

Kísérleti tapasztalat, hogy a törési sebesség növelése (például lökésszerű) mintegy 10-50 %-kal fokozza a nyomófeszültséget és a nyomószilárdságot, míg a fellépő alakváltozások kisebbek lesznek (Palotás László: Mérnöki szerkezetek anyagtana, 1. kötet. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979. 394. oldal).

Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy lökésszerű igénybevétel esetén az anyag kisebb törőerő mellett megy tönkre, de az anyagban a feszültség eloszlás nem egyenletes, helyi feszültségcsúcsok lépnek fel. A dinamikus teher okozta legnagyobb feszültség, a törőszilárdság maga nagyobb, mint a statikus érték, de nem ezt mérjük, ez egy helyi feszültség következménye.

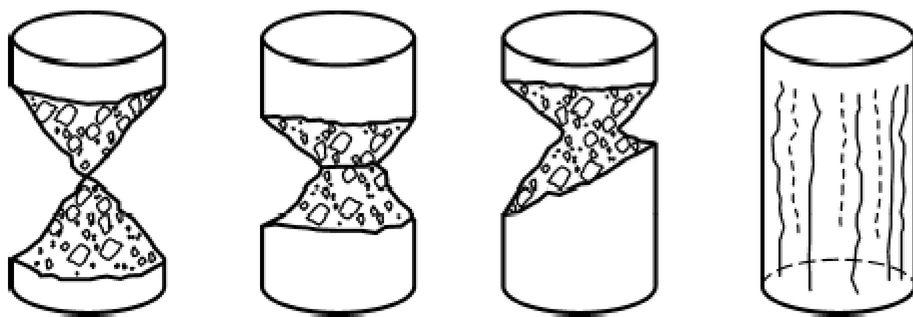
Próbakocka megfelelő, szabályos, szimmetrikus törésképpel

Próbakocka nem megfelelő, szabálytalan, aszimmetrikus törésképpel

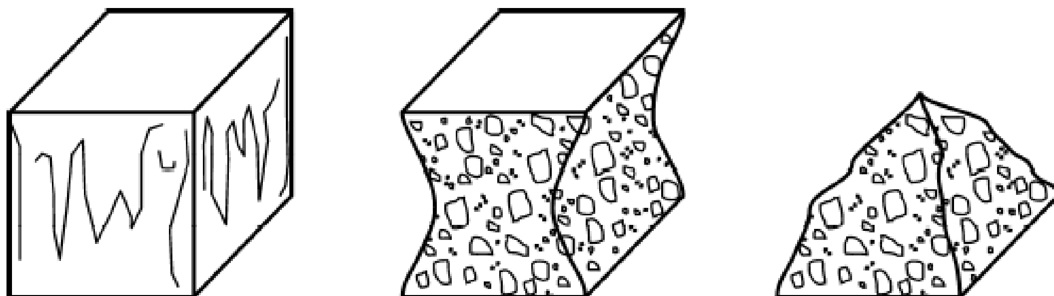




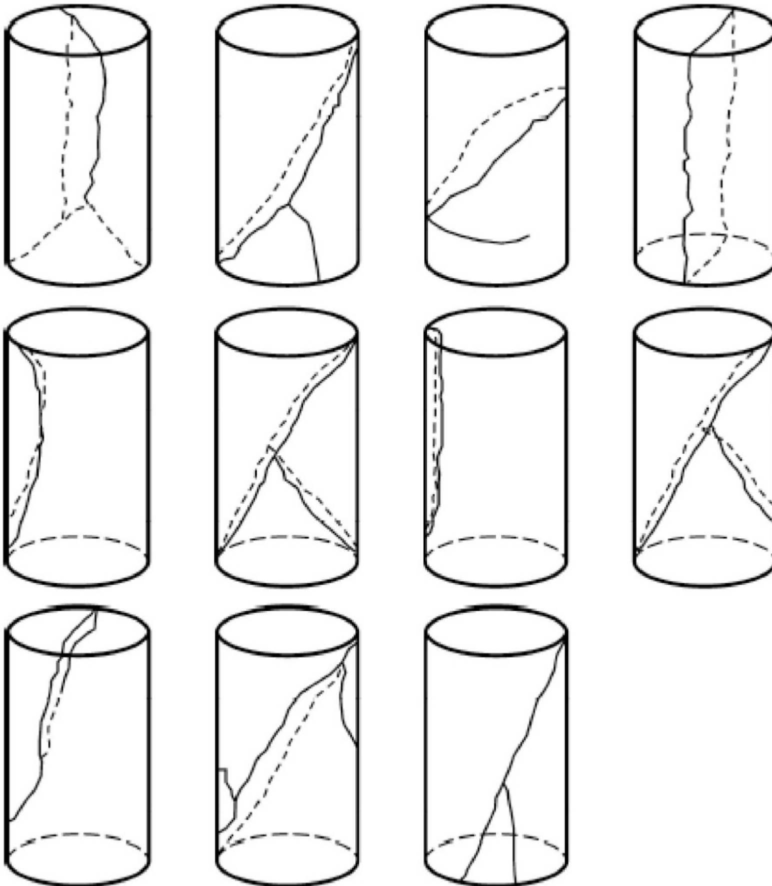
Próbahengerek megfelelő törésképe (MSZ EN 12390-3:2009, *Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl – Breit*: „Handbuch der Betonprüfung. Verlag Bau+Technik. Düsseldorf, 2012)



Próbakockák megfelelő törésképe. Megjegyzés: Mind a négy szabad felület közel egyformán törik, a nyomólappal érintkező felületek általában alig sérülnek. A harmadik próbakocka „szétrobbant, összeroppant" (MSZ EN 12390-3:2009 *Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl – Breit*: „Handbuch der Betonprüfung. Verlag Bau+Technik. Düsseldorf, 2012).

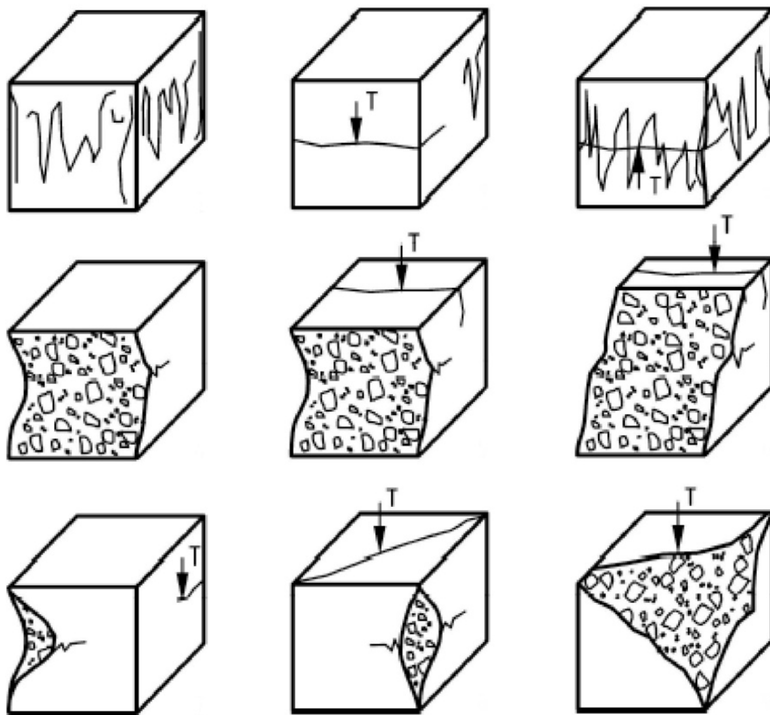


Próbahengerek nem megfelelő törésképe (MSZ EN 12390-3:2009, *Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl – Breit*: „Handbuch der Betonprüfung. Verlag Bau+Technik. Düsseldorf, 2012)

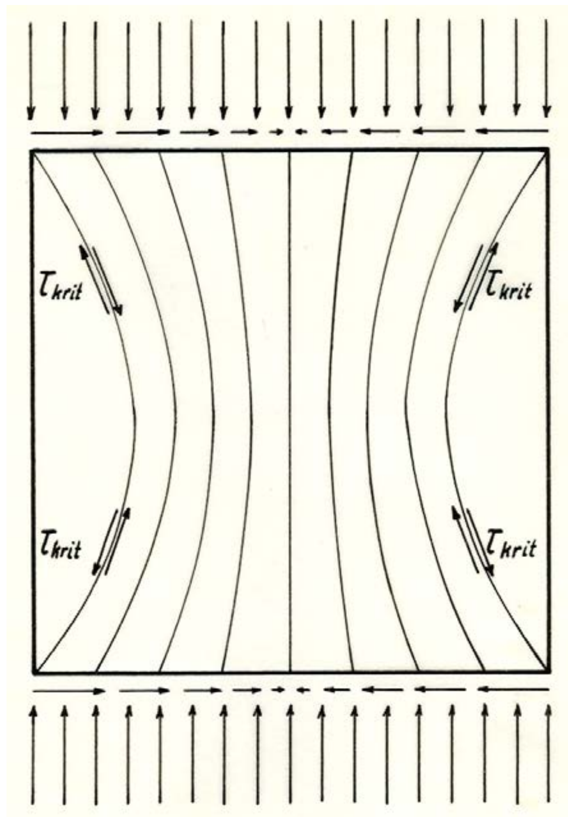


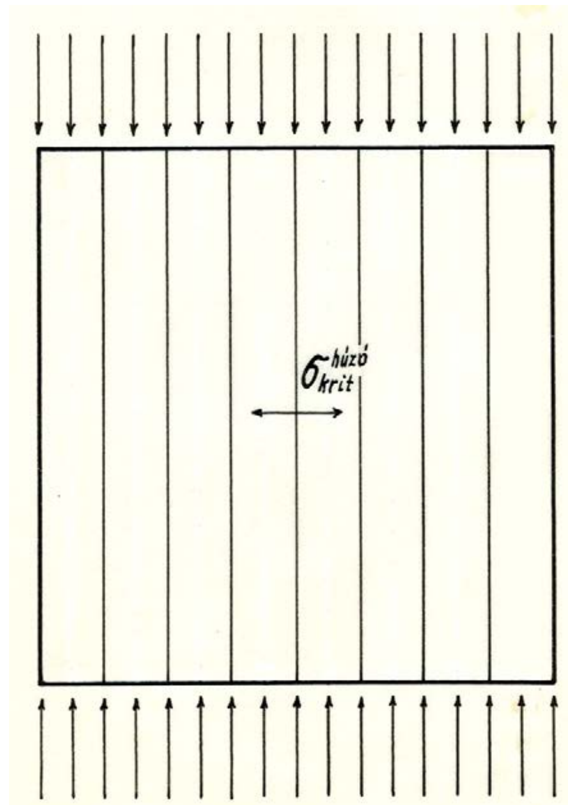
Próbakockák nem megfelelő törésképe.

Megjegyzés: T = Repedés húzásra (MSZ EN 12390-3:2009, *Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl – Breit*: „Handbuch der Betonprüfung. Verlag Bau+Technik. Düsseldorf, 2012)



Csúszótörés Szakadótörés





(*Palotás – Balázs*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1980.)

Sablonban készített, 28 napos korú, végig víz alatt tárolt, Ø150×300 mm méretű, különböző módon előkészített nyomott felületű próbahengerek nyomószilárdsága

Nyomott felület kialakítása	Felső lap cement-habarccsal simított, alsó lap natúr	Felső lap csiszolt, alsó lap natúr	Mind a két lap csiszolt
Végig víz alatt tárolt, 28 napos korú Ø150×300 mm méretű próbahengerek	Töréskor nem robbantak	Töréskor robbantak	Töréskor robbantak
Átlagos nyomószilárdság, N/mm^2	42,8	51,4	52,7
Nyomószilárdság, %	100,0	120,0	123,1
Szórás, N/mm^2	1,68	0,67	1,64
Szórás a terjedelemből számítva, N/mm^2	1,95	0,71	1,89
Mértékadó szórás, N/mm^2	3,00	3,00	3,00
Student-tényező, n = 3	2,92	2,92	2,92
Jellemző érték, N/mm^2	34,06	42,63	43,94
Nyomószilárdsági osztály	C30/37	C40/50	C40/50

Sablonban készített, 28 napos korú, végig víz alatt tárolt, Ø150×300 mm méretű, cementhabarccsal simított és csiszolt felső nyomott felületű nyomószilárdság vizsgálati próbahengerek



Sablonban készített, 28 napos korú, végig víz alatt tárolt, Ø150×300 mm méretű, natúr és csiszolt alsó nyomott felületű nyomószilárdság vizsgálati próbahengerek



A meg nem felelő méretű vagy alakú próbatestek csiszolással történő kiigazítása nem megengedett, mert a korrekciós tényezőnek jelenleg nincs közmegegyezéssel elfogadott értéke.

Ha a vizsgálati módszert megváltoztatjuk (például a nyomószilárdság vizsgálati próbatestek nyomott felületének csiszolásával), akkor a mért tulajdonság követelmény-értéke (nyomószilárdsági osztály) érvényét veszti!

Próbahengerek mind a két nyomott felületének kénhabarcsos sapkázása az ASTM C 39 szabvány szerint

Forrás: https://www.youtube.com/watch?v=PqTzsN4nz-4 (*Fiusac*: Ensayo a compresión de probetas normalizadas de concreto según norma ASTM-C-39)

















Kénpor a kénhabarcs készítéséhez
Forrás: https://www.youtube.com/watch?v=DNnv0Pee_Yg
(*Matt OReilly*: „Preparing and testing 4x8 cylinders to determine compressive strength"



Alul és felül kénhabarcs sapkával ellátott próbahenger nyomószilárdság vizsgálat előtt Forrás: Egyezik a fenti kép forrásával

Próbahengerek nyomott felületének neoprén betétes elasztomer-papucsozása az ASTM C 1231 szabvány szerint

Forrás: https://www.youtube.com/watch?v=Wz5zJjQuFkM (*Hernán Alvarado*: „Uso de almodillas de neopreno para refrendado de probetas de concreto - ASTM C1231”)

Kénhabarcs por, illetve „lemezke” és neopren reklámok

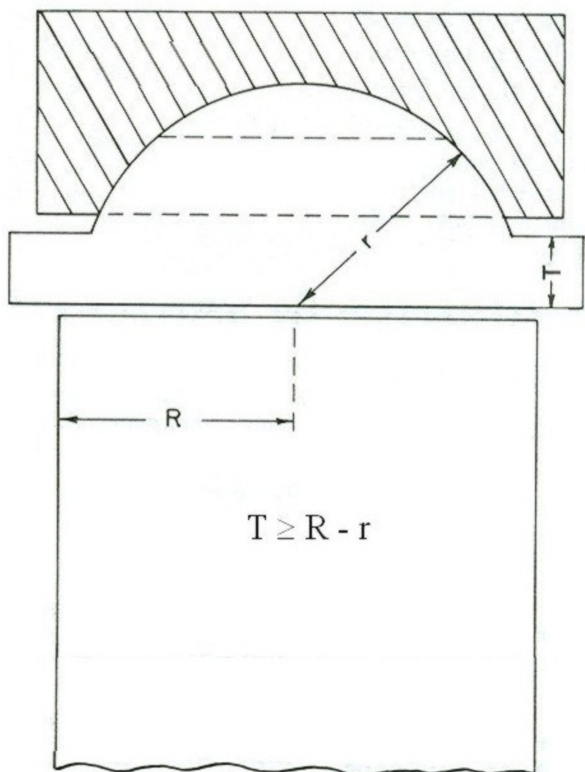
Forrás: https://www.globalgilson.com/compressive-strength-testing-sulfur-capping-or-neoprene-pads

Szürke kénhabarcs-lemezkék	**Neoprén-betét**
Pontos és széles körben elfogadott sapkázási módszer. Használata során a biztonsági és szellőztetési utasítások betartandók. A kénhabarcs sapkázás 10-110 MPa nyomószilárdság között alkalmazható. A vizsgálat előtti keményedési idő 2-16 óra. Alkalmazásával megbízható vizsgálati eredményeket lehet elérni.	A neoprén-betét százszor használható. Kevés előkészítéssel alkalmazható, kikeményedési időre nincs szükség. Minden esetben papucsot kell alkalmazni, a vizsgálat valamivel lassabban végezhető el. Töréskor a biztonsági előírás betartandó. A vizsgálati eredmények neoprén-betét alkalmazása esetén kevésbé megbízhatóak.

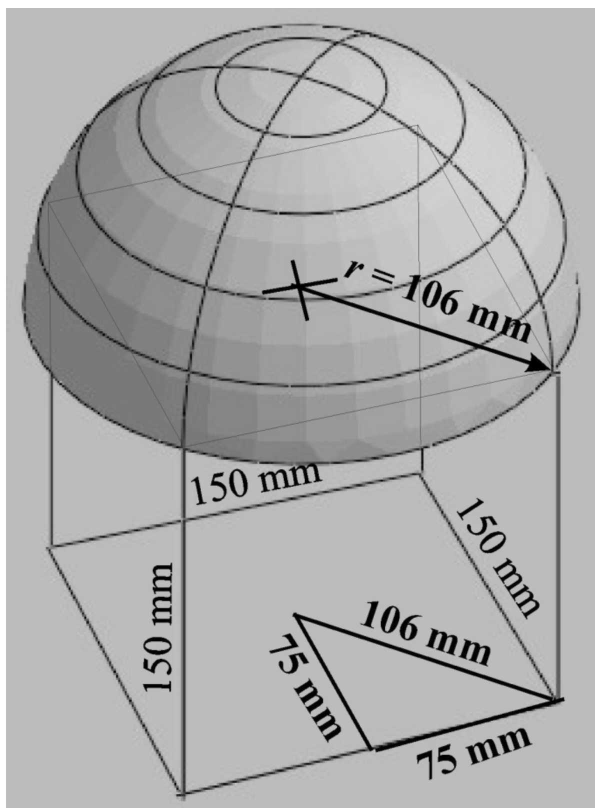
Forrás: http://www.matest.com/en/Products/concrete/CONCRETE-SPECIMENS-PREPARATION/cylinder-capping-equipment-sulphur-method/c290-06-capping-compound-225-kg



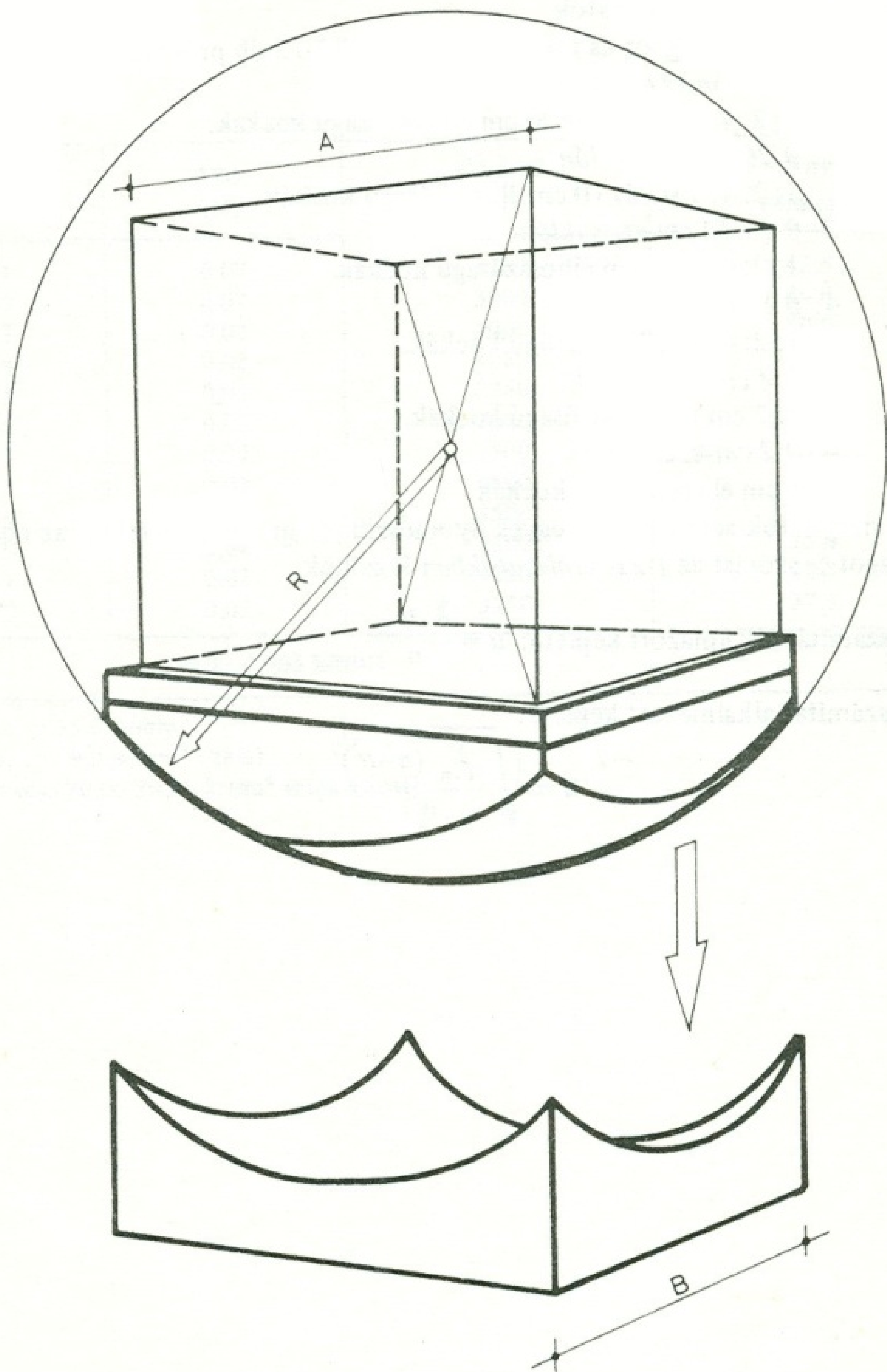
ASTM C 39:1972 szabvány szerinti gömbcsukló szerkesztése a próbahenger nyomószilárdságának vizsgálatához



RILEM ajánlás gömbcsukló szerkesztésére a próbakocka nyomószilárdságának vizsgálatához



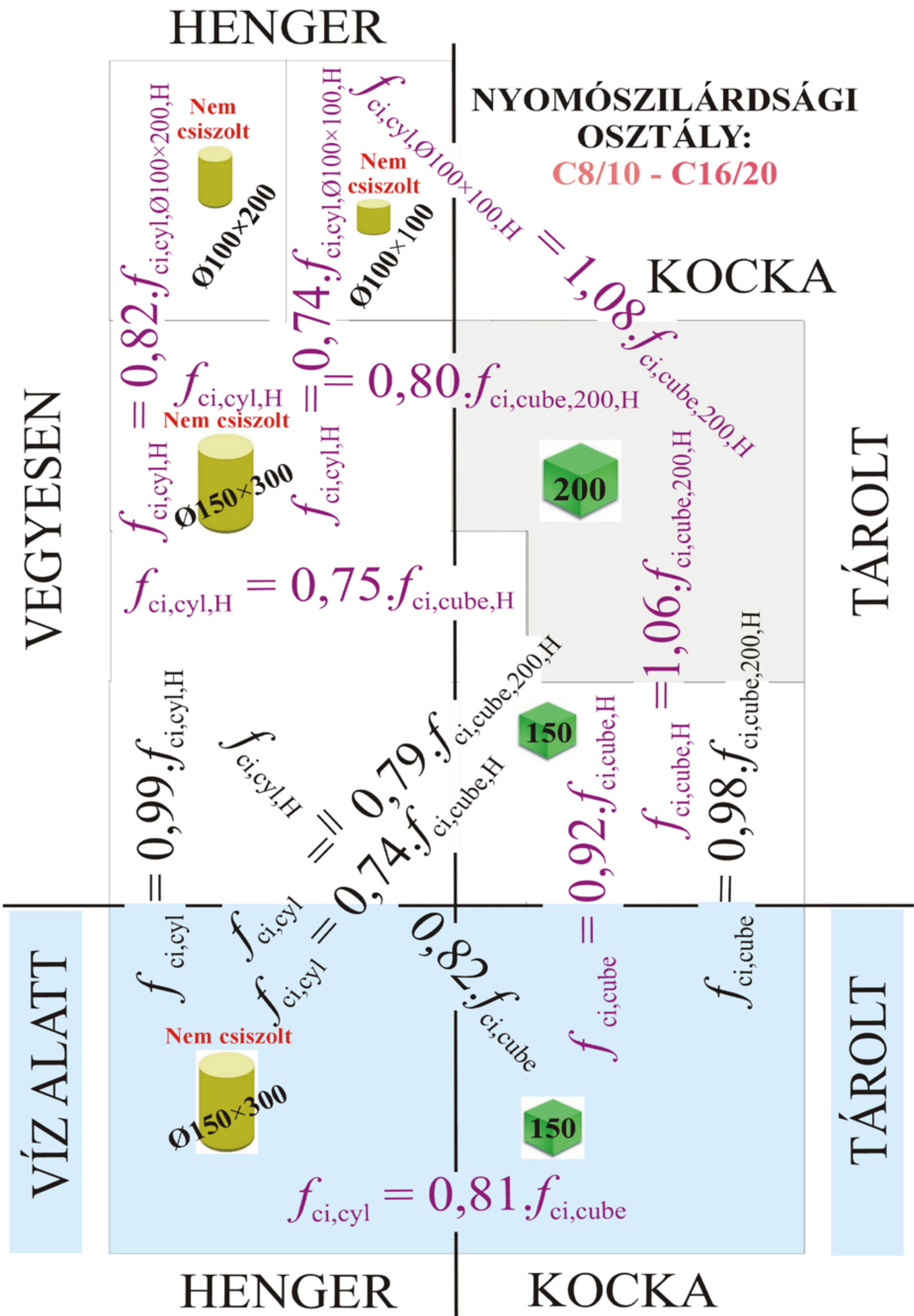
Dombi József gömbcsukló rajza



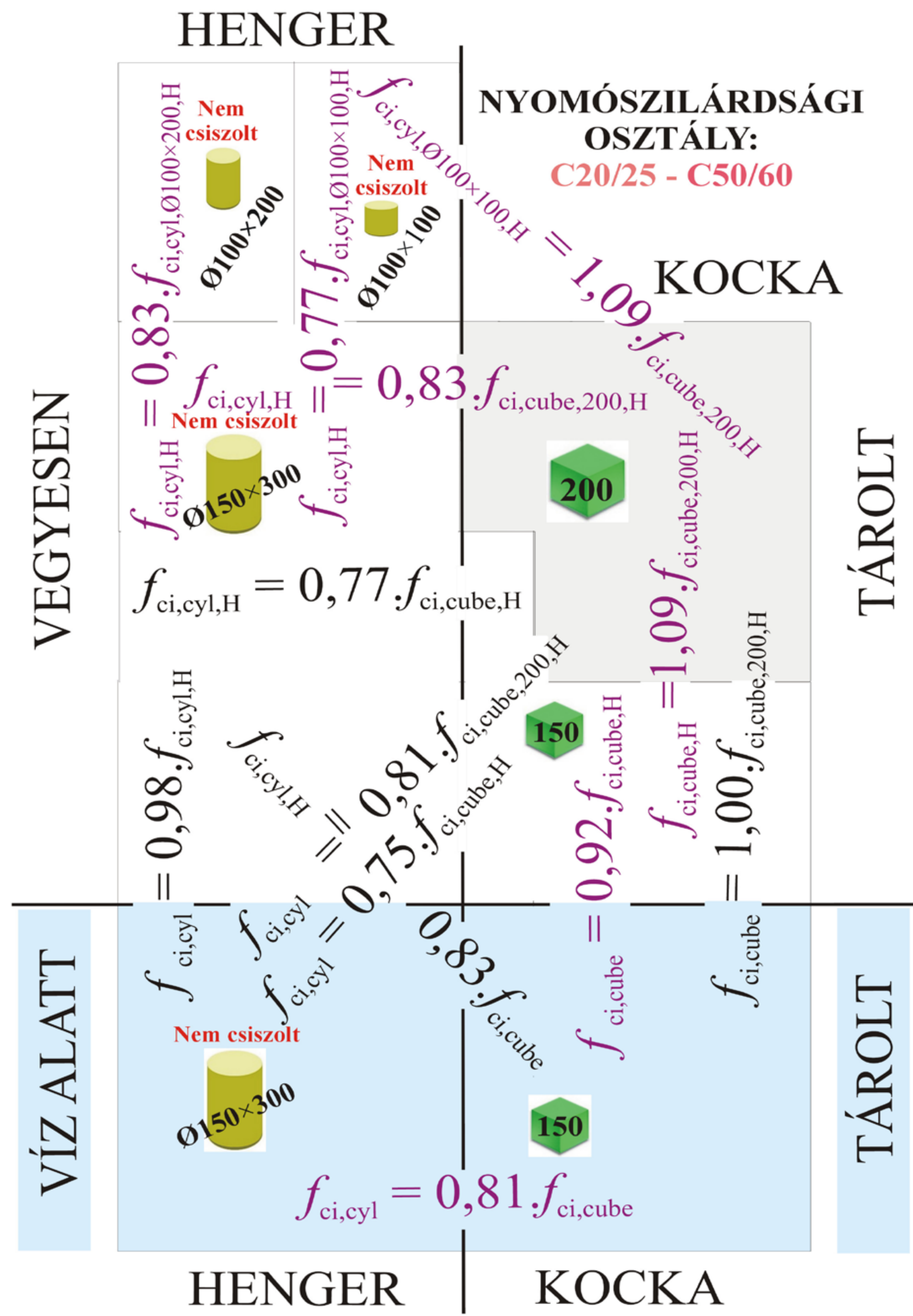
Dombi József gömbcsukló sorozatának fényképei (1979)



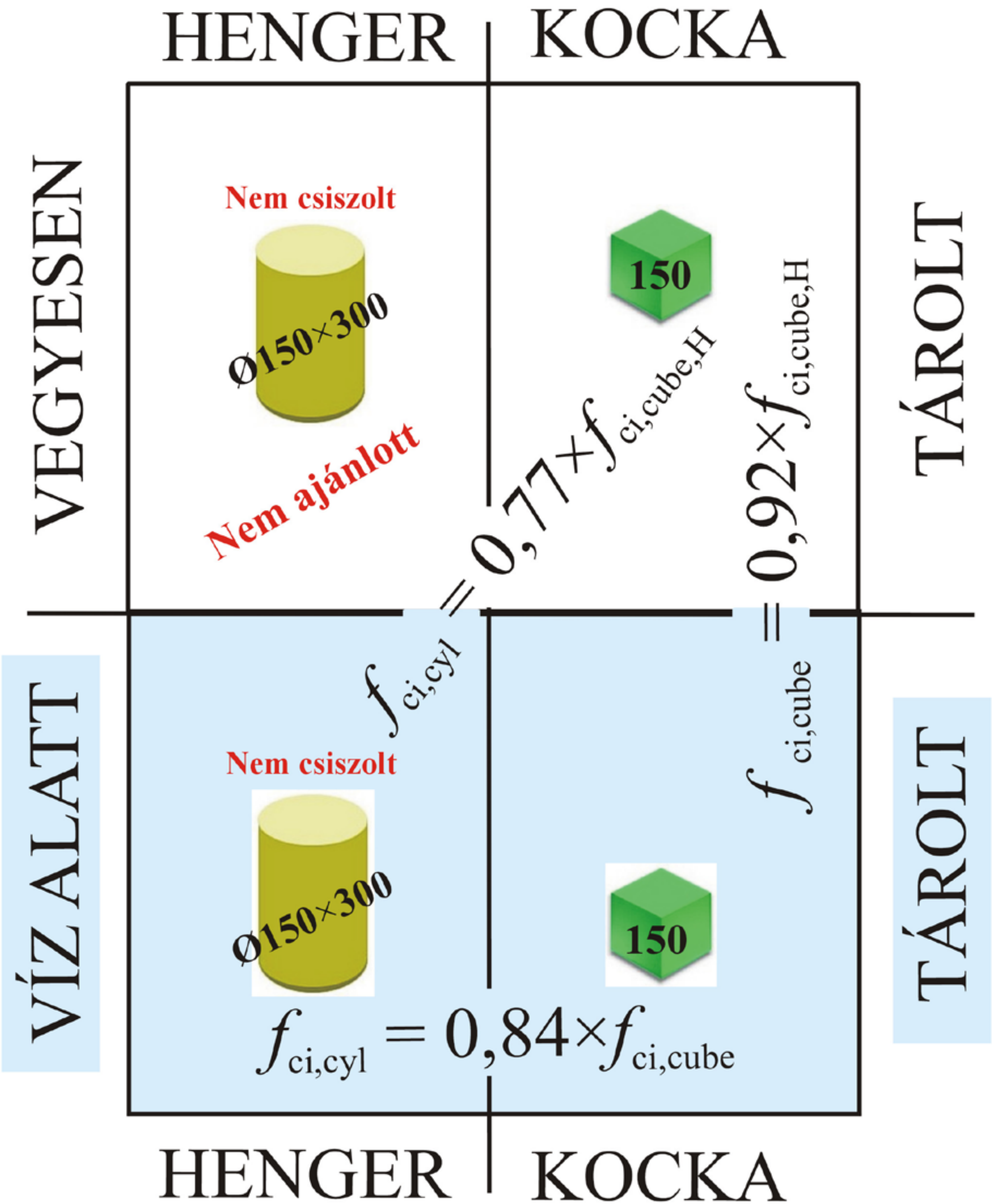
Közelítő összefüggések különböző alakú és méretű, víz alatt vagy vegyesen tárolt próbatesteken meghatározott egyes, illetve átlagos beton nyomószilárdságok között, ha a nyomószilárdsági osztály C8/10 – C16/20



Közelítő összefüggések különböző alakú és méretű, víz alatt vagy vegyesen tárolt próbatesteken meghatározott egyes, illetve átlagos beton nyomószilárdságok között, ha a nyomószilárdsági osztály C20/25 – C50/60



Közelítő összefüggések különböző alakú és méretű, víz alatt vagy vegyesen tárolt próbatesteken meghatározott egyes, illetve átlagos beton nyomószilárdságok között, ha a nyomószilárdsági osztály C55/67 – C100/115



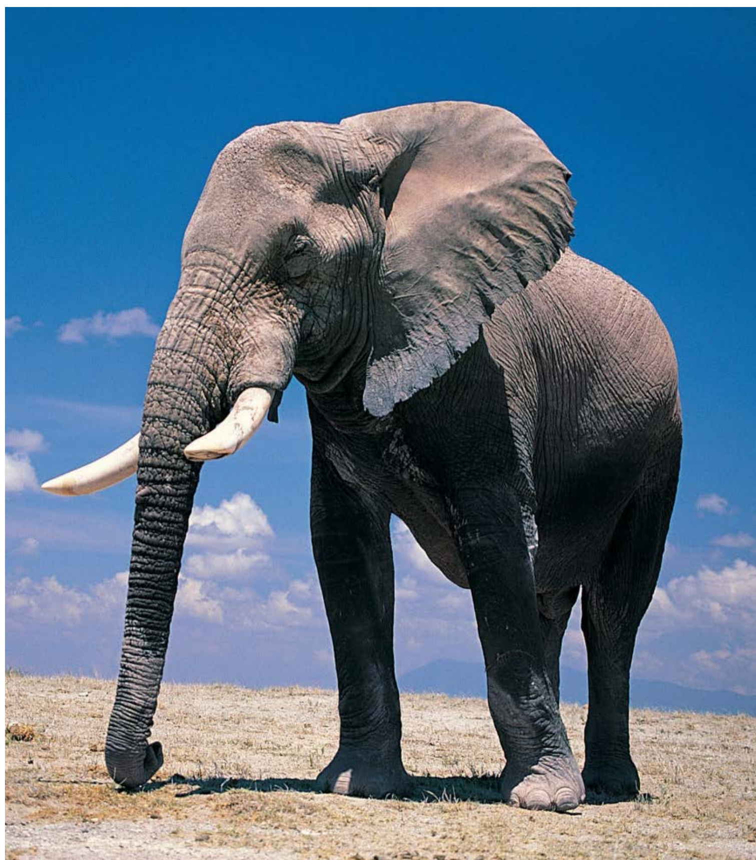
<u>A fenti három ábra összefüggései</u> csak az egyes vagy az átlagos nyomószilárdságokra érvényesek, <u>a jellemző (karakterisztikus) értékekre és a nyomószilárdsági osztályokra nem értelmezhetők!!!</u>

Nyomó-szilárdsági osztály	Nyomószilárdság előírt karakterisztikus (jellemző) értéke a szilárdságvizsgálatig víz alatt tárolt Ø150×300 mm méretű próbahengerek esetén. A legkisebb karakterisztikus (jellemző) hengerszilárdság $f_{ck,cyl}$ N/mm^2	Nyomószilárdság előírt karakterisztikus (jellemző) értéke a szilárdságvizsgálatig víz alatt tárolt 150 mm élhosszúságú próbakockák esetén. A legkisebb karakterisztikus (jellemző) kockaszilárdság $f_{ck,cube}$ N/mm^2
C8/10	**8**	**10**
C12/15	**12**	**15**
C16/20	**16**	**20**
C20/25	**20**	**25**
C25/30	**25**	**30**
C30/37	**30**	**37**
C35/45	**35**	**45**
C40/50	**40**	**50**
C45/55	**45**	**55**
C50/60	**50**	**60**
C55/67	**55**	**67**
C60/75	**60**	**75**
C70/85	**70**	**85**
C80/95	**80**	**95**
C90/105	**90**	**105**
C100/115	**100**	**115**

Vasbetont csak legalább C20/25, **feszített vasbetont** csak legalább C30/37 nyomószilárdsági osztályú betonból szabad készíteni.

(MSZ 4798:2016 és MSZ EN 13369:2013)





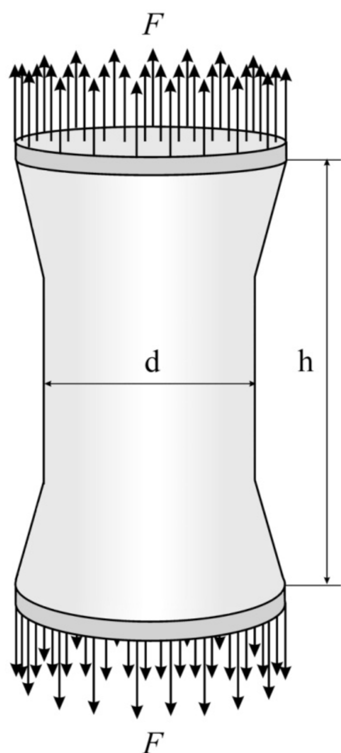
Ha a vasbeton készítésére alkalmas C20/25 nyomószilárdsági osztályú betonból készült 150 mm élhosszúságú, végig víz alatt tárolt, 28 napos korú próbakocka nyomószilárdsága 33 N/mm^2, akkor ez a beton próbakocka hány 5 tonna (5000 kg) tömegű afrikai elefántot bír el anélkül, hogy eltörne?

Az 5 tonna tömegű afrikai elefánt súlya 9,81×5000 = 49050 N.

A 33 N/mm^2 nyomószilárdságú próbakocka 33×150×150 = 742500 N terhelőerő hatására törik el.

A 33 N/mm^2 nyomószilárdságú, 150 mm élhosszúságú próbakocka tehát 742500/49050 = 15,1 afrikai elefánt alatt fog eltörni, azaz 15 darab 5 tonnás afrikai elefánt állhatna rá anélkül, hogy a próbakocka eltörne (*biztonsági tényezővel számolva 15/1,5 = 10 elefánt*).

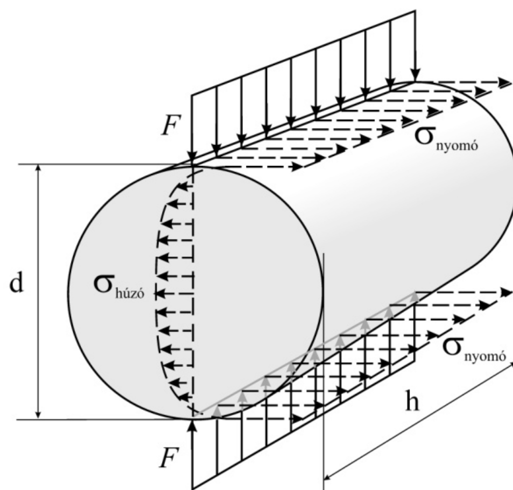
<table>
<tr>
<td rowspan="2">



$$f_{cti} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

Közvetlen, tiszta, középpontos húzószilárdság meghatározása próbahengeren

</td>
<td>

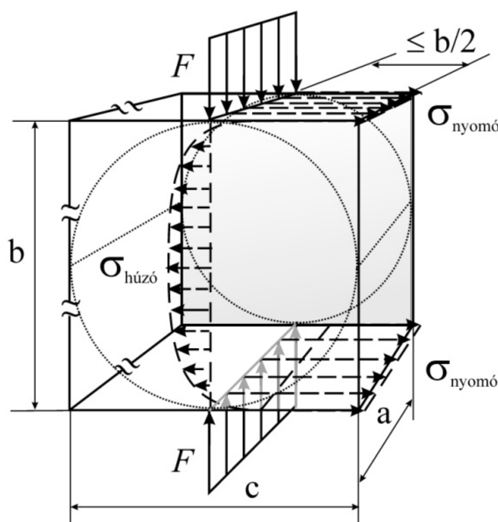


</td>
<td>

$$f_{ct,spi} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \approx$$
$$\approx \frac{0{,}64 \cdot F}{d \cdot h}$$

Hasító-húzószilárd-ság meghatáro-zása próbahenge-ren

</td>
</tr>
<tr>
<td>



</td>
<td>

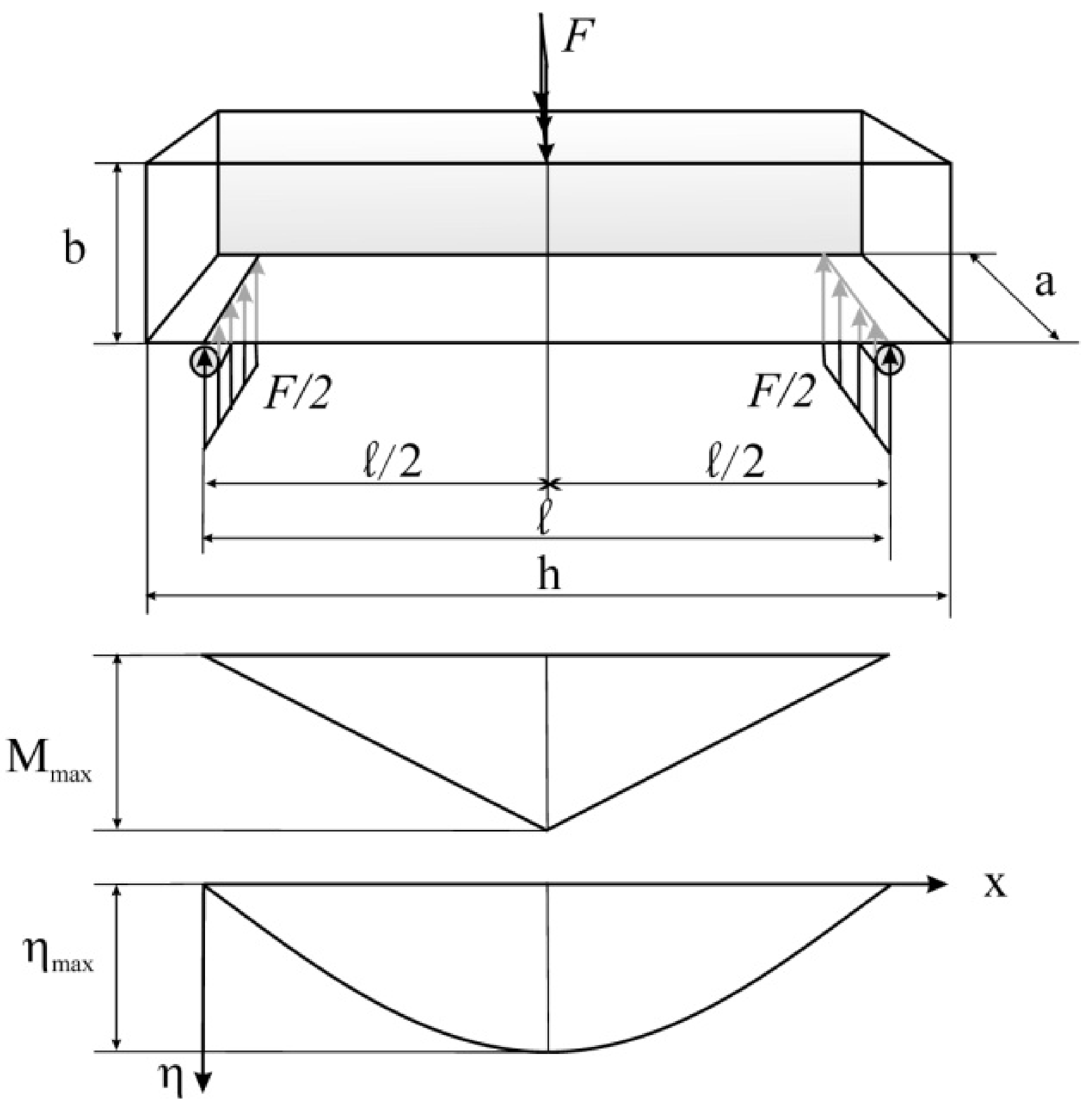
$$f_{ct,spi} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot a}$$

MSZ 4715-4:1972 szabvány 3.4.2. szakasza és *Palotás – Balázs* (1980.) szerint:

$$f_{ct,spi} = \frac{0{,}58 \cdot F}{a \cdot b}$$

Hasító-húzószilárd-ság meghatáro-zása próbakockán, illetve hasábvégen

</td>
</tr>
</table>

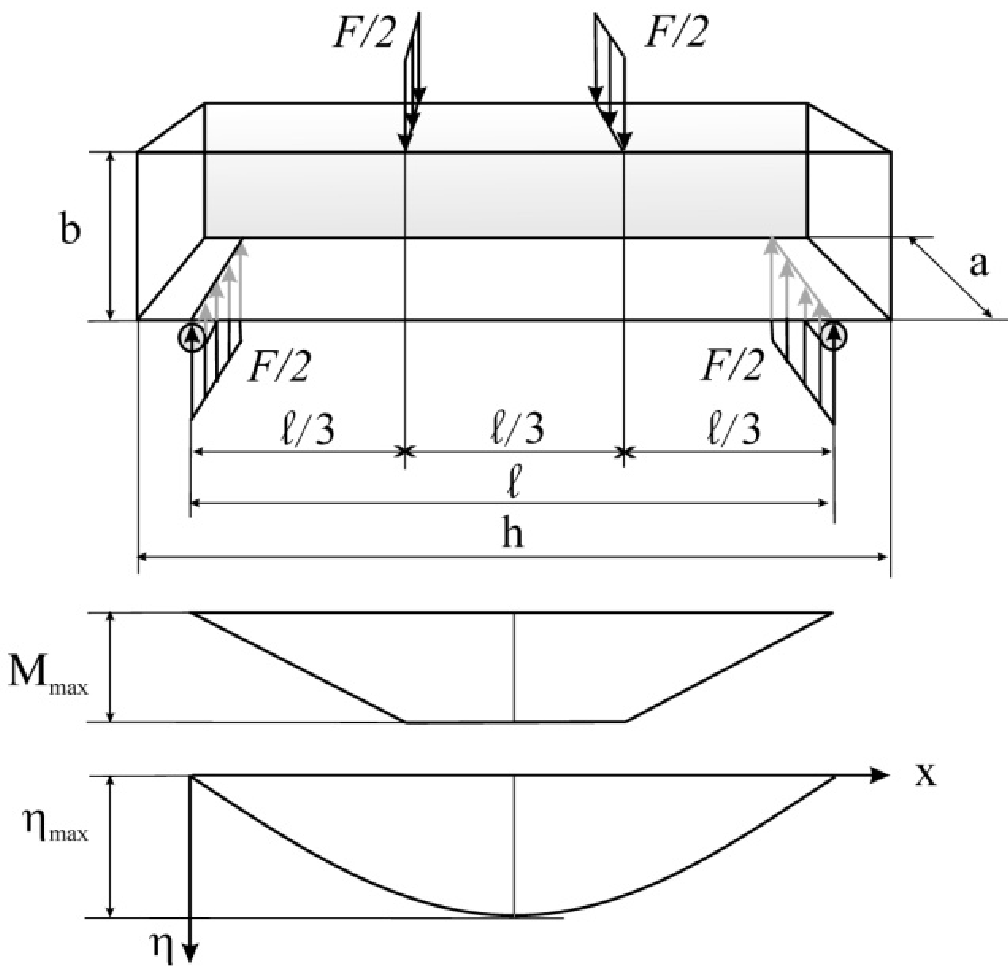


$$f_{cfi} = \frac{M_{\text{max}}}{K} = \frac{F \cdot \ell / 4}{a \cdot b^2 / 6} = 1{,}5 \cdot \frac{F \cdot \ell}{a \cdot b^2}$$

$$\eta = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot I} \cdot \left[3 \cdot \frac{x}{\ell} - 4 \cdot \left(\frac{x}{\ell} \right)^3 \right] \quad 0 \leq x \leq \ell / 2$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot \ell^3}{E \cdot I}$$

Hajlító-húzószilárdság meghatározása próbagerendán középpontos terheléssel



$$f_{cfi} = \frac{M_{max}}{K} = \frac{F \cdot \ell / 6}{a \cdot b^2 / 6} = \frac{F \cdot \ell}{a \cdot b^2}$$

$$\eta = \frac{F}{324 \cdot E \cdot I} \cdot \left(18 \cdot \ell^2 \cdot x - 27 \cdot x^3\right) \quad 0 \leq x \leq \ell / 3$$

$$\eta = \frac{F}{324 \cdot E \cdot I} \cdot \left(27 \cdot \ell^2 \cdot x - 27 \cdot \ell \cdot x^2 - \ell^3\right)$$

$$\ell / 3 \leq x \leq \ell / 2$$

$$\eta_{max} = \frac{23}{1296} \cdot \frac{F \cdot \ell^3}{E \cdot I}$$

Hajlító-húzószilárdság meghatározása próbagerendán harmad-pontos terheléssel

Terhelési sebesség a beton hajlító-húzószilárdságának vizsgálata esetén

Az *NBN B 15-238* belga szabvány szerint a terhelő (hajlító) erőt úgy kell szabályozni, hogy az elmozdulás (lehajlás) sebessége

0,5 mm lehajlásig 0,07 ± 0,04 mm/perc

0,5 mm lehajlást követően 0,5 ± 0,2 mm/perc

tartományba essék.

<u>Így például</u> 3 mm lehajlást

maximum 0,5/0,03 + 2,5/0,3 = 16,67 + 8,33 = 25 perc

minimum 0,5/0,11 + 2,5/0,7 = 4,54 + 3,57 = 8 perc

átlagban 0,5/0,07 + 2,5/0,5 = 7,14 + 5,0 = 12,14 perc

alatt kell elérni.

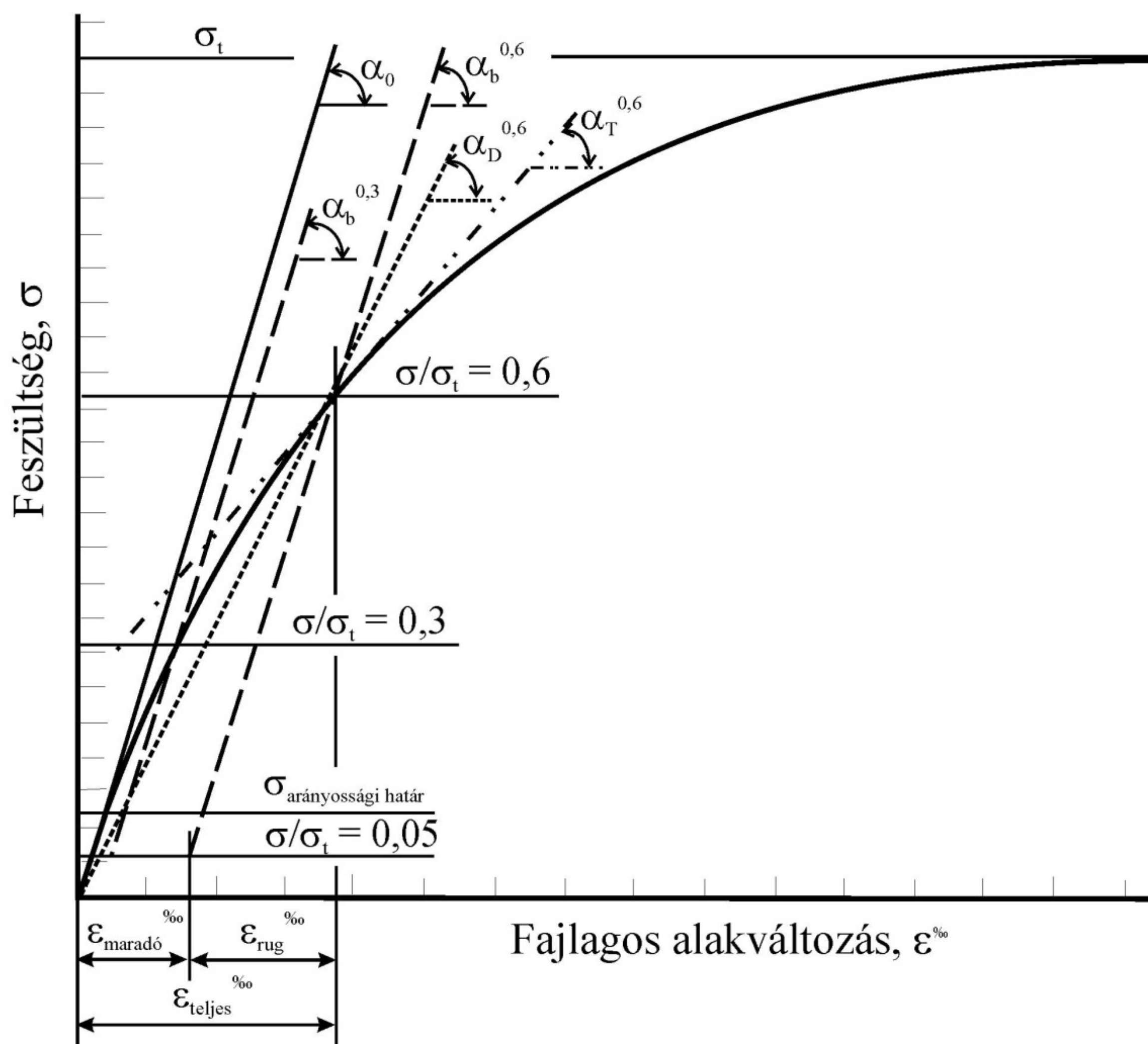
Statikai rugalmassági modulus

A rövididejű feszültség – alakváltozás viszonya a statikai rugalmassági modulussal írható le, az idő hatásának figyelembevétele nélkül. A statikai rugalmassági modulus értéke az ε–σ koordinátarendszerben ábrázolt (fajlagos) alakváltozás–feszültség görbe nevezetes pontjaiban értelmezett iránytangensek változásával változik. Így megkülönböztetjük az arányossági határon belül a **kezdeti** (jele: E_0), az arányossági határ felett a **tehermentesítési rugalmassági modulust** (jele: E_b), a stabilitás vizsgálatoknál szerephez jutó **érintő-modulust** (jele: E_T) és az **alakváltozási modulusnak is nevezett húr-modulust** (jele: E_D). Az alakváltozási modulust (húr-modulust) akkor kapjuk, ha a húzó-nyomófeszültséghez az arányossági határon túl nem a rugalmas fajlagos alakváltozást (ε_{rug}), hanem a teljes fajlagos alakváltozást (ε_{teljes}) rendeljük: $E_{alakváltozási} = E_D = \sigma/\varepsilon_{teljes}$.

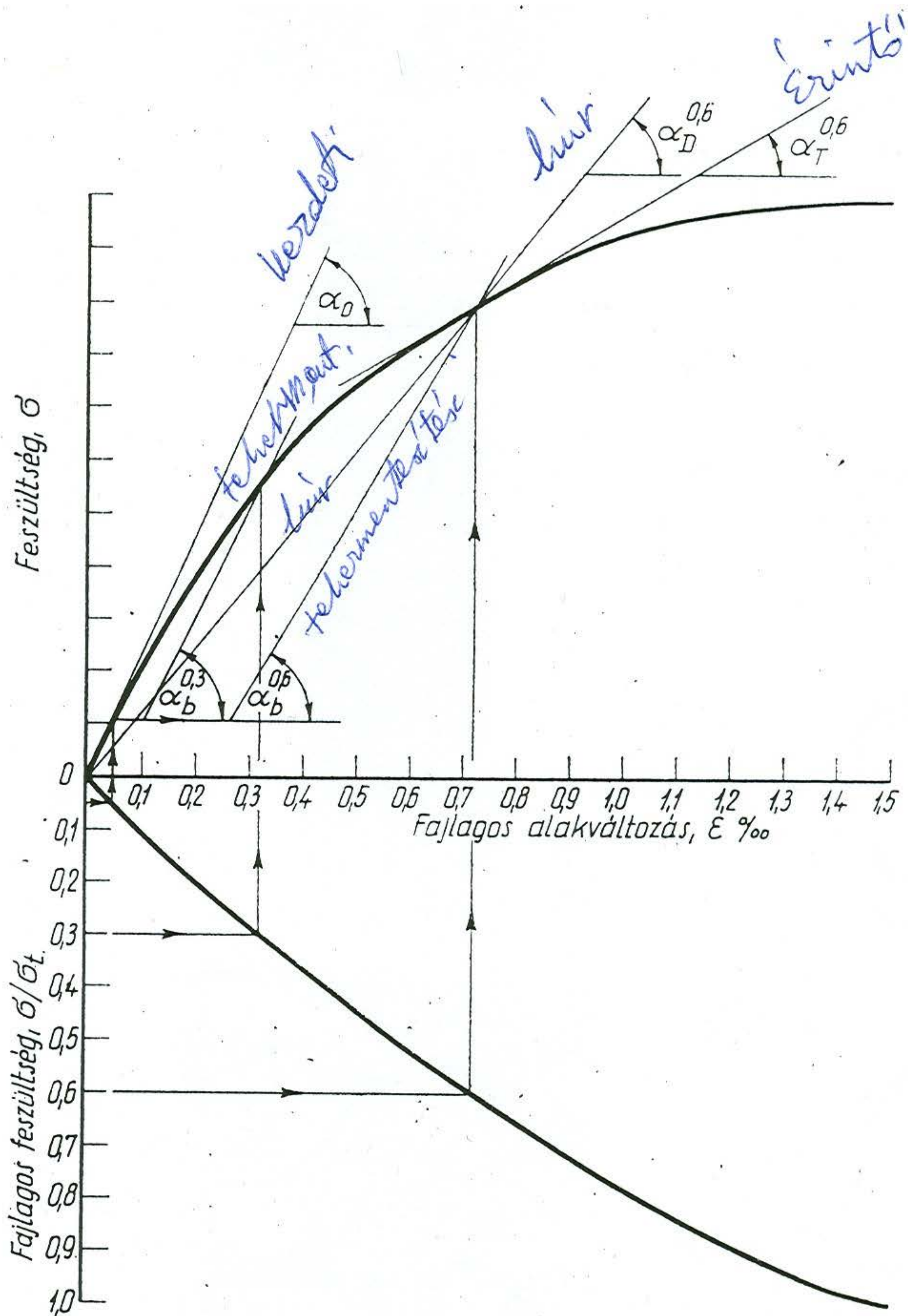
A *kezdeti rugalmassági modulus* (E_0) az *ε–σ görb*e (a gyakorlatban általában σ–ε görbének nevezik, ezért ezt az elnevezést követjük) arányossági határon belüli lineáris szakasza hajlásszögének (α_0) iránytangense ($E_0 = \mathrm{tg}\alpha_0 = \sigma/\varepsilon_{rug}$). E megfogalmazás során elvonatkoztatunk attól, hogy a σ–ε görbe a lineáris szakasz alatt az abszcissza tengelyhez közel aszimptotikusan illeszkedik.

A kezdeti rugalmassági modulus a beton nyomószilárdságának növekedésével kissé növekszik, miközben a nagyobb nyomószilárdságú beton fajlagos alakváltozása valamelyest kisebb. A nyomószilárdság elérése után a nagyobb szilárdságú beton fajlagos

alakváltozása rohamosabban csökken, mint a kisebb nyomószilárdságú betoné. A beton *σ–ε* görbéjének fel- és leszálló ága a nagyobb nyomószilárdságú beton esetén meredekebb, mint a kisebb nyomószilárdságú beton esetén. A nyomószilárdság közelében a nagyobb nyomószilárdságú beton *σ–ε* görbéje „csúcsosabb”, a kisebb nyomószilárdságú beton *σ–ε* görbéje „laposabb” (*P. Grübl – H. Weigler – S. Karl*: „Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften” Ernst & Sohn. Berlin, 2001., *R. Springenschmid*: „Betontechnologie für die Praxis” Bauwerk Verlag, Berlin 2007.).



A beton statikai rugalmassági modulusainak értelmezése



7. ábra. Rugalmassági modulusok értelmezése

A betonok és kőanyagok σ-ε feszültség-alakváltozás görbéjét az MSZ 4715/6-72 illetve az MSZ 18285/1-1989 szabványokban rögzített mérési elvek szerint szokás felvenni. A korábban manuálisan szabályozott mérés végrehajtásához ma már rendelkezésre áll olyan számítógépes program, amellyel a régi, 20-30 éves nyomószilárdság vizsgáló gépek is vezérelhetők, miáltal a nagy körültekintést igénylő mérés a korábbinál megbízhatóbban hajtható végre. Nyitott kérdés azonban továbbra is, hogy a mérési adatokból milyen módszerrel számítsuk ki a vizsgált anyag tulajdonságát jellemző rugalmassági modulusokat. Erre mutatunk be egy, a gyakorlatban alkalmazott és bevált eljárást.

1. Kiszámítjuk a σ-ε burkológörbe mérési pontjaira fektetett regressziós, $y = - a*x^2 + b*x$ alakú, origón átmenő másodfokú parabola a és b együtthatóját.

2. *Kezdeti rugalmassági modulus:*

$$E_0 = 1000 * b$$

3. *Húr* vagy *alakváltozási modulus:*

$$E_D^{0,6} = 1000 \quad * \quad \frac{y^{0,6 törő}}{x^{0,6 törő}}$$

4. *Érintő modulus:*

$$E_T^{0,6} = 1000 * b \quad - 2000 * a * x^{0,6 törő}$$

ahol:

$$x^{0,6 törő} = \frac{b}{2*a} - \sqrt{\frac{b^2}{4*a^2} - \frac{y^{0,6 törő}}{a}}$$

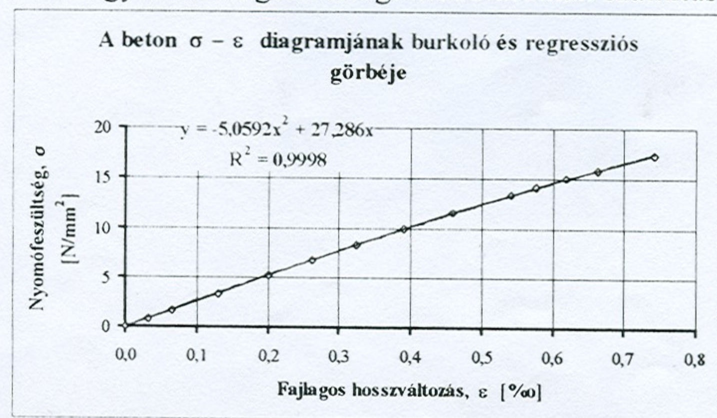
5. *Tehermentesítési rugalmassági modulusok*, a $\sigma_{0,05*H} = 0,05*H$ értékű tehermentesítési alsó pontot megelőző leszállóág és követő felszállóág iránytangenseinek átlagaként:

$$E_b^{0,3} = 500 * \left[\frac{0,3*H - 0,05*H}{\varepsilon^{0,3}‰ - \varepsilon^{0,3}_{m,0,05}‰} + \frac{0,4*H - 0,05*H}{\varepsilon^{0,4}‰ - \varepsilon^{0,3}_{m,0,05}‰} \right]$$

$$E_b^{0,6} = 500 * \left[\frac{0,6*H - 0,05*H}{\varepsilon^{0,6}‰ - \varepsilon^{0,6}_{m,0,05}‰} + \frac{0,7*H - 0,05*H}{\varepsilon^{0,7}‰ - \varepsilon^{0,6}_{m,0,05}‰} \right]$$

ahol: H az alakváltozás-mérés nélkül törésig terhelt hasábok hasábszilárdsága, N/mm²

Példa egy beton rugalmassági modulusainak számítására:



Rug. mod. [N/mm²]		
E_o	=	27286
$E_D^{0,6}$	=	24809
$E_T^{0,6}$	=	22332
$E_b^{0,3}$	=	26050
$E_b^{0,6}$	=	25756

Rugalmassági modulus

Anyag megnevezése	Rugalmassági modulus N/mm^2	Irodalmi forrás
ACÉL		
Betonacél, B 37 és B 52 minőségű (szakítószilárds.) Hőmérséklet [°C] esetén: 20 100 200 300 400	 210.000 205.000 193.000 185.000 175.000	Palotás László: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. 1979. p. 370.
Melegen hengerelt betonacél	206.000	MSZ 15022-1:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 1. rész: Vasbeton szerkezetek
Feszítőhuzalok és pászmák	195.000	MSZ 15022-2:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 2. rész: Feszített vasbeton szerkezetek
ALUMÍNIUM		
Alumínium	70.000	Palotás László: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. pp. 432, 435.
BETON		
Beton, nyomási kezdeti rugalmassági modulus C 10 C 16 C 20 C 25 C 30 C 40 C 55	 24.900 27.400 28.800 30.500 31.900 34.500 37.800	MSZ 15022-1:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 1. rész: Vasbeton szerkezetek
Beton, nyomási rugalmassági modulus E_0 kezdeti E_b tehermentesítési E_D húr E_T érintő	 26.200 – 31.000 24.000 – 25.300 21.800 – 25.700 16.300 – 20.200	Fenyves Hedvig – Kausay Tibor: Előregyártott közönséges és feszített vasbeton tartók betonjának rugalmassági modulusa. Építőanyag. 1982. 3. szám. pp. 86-98.

Anyag megnevezése	Rugalmassági modulus N/mm^2	Irodalmi forrás
MŰANYAG		
Polipropilén szál Fibrin Politon (magyar)	 < 18.000 6.000	Szálerősítésű betonok. A fib konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
Poliakrilnitril szál	17.000 – 20.000	
Aramid (Poliaramid) szál	50.000 – 150.000	
NÖVÉNY		
Fa hajlító-húzási rugalmassági modulusa, rostokkal párhuzamos Hárs, nyár Erdei-, jegenye-, lucfenyő Tölgyfa Kőris, akác, vörösfenyő Nyír, bükk	 7.000 – 8.000 10.000 – 10.500 11.500 12.000 – 12.500 14.000 – 14.500	Palotás László: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. 1979. pp. 92.
Fa hajlító-húzási rugalmassági modulusa, rostokkal párhuzamos (nedvességtartalom függvényében)	5.555 (n=26 tömeg%) átszámítva: 7.111 (n=12 tömeg%)	Mérési eredmények egyike laboratóriumi gyakorlaton. (BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék)
Cellulóz szál	5.000 – 40.000	Szálerősítésű betonok. A fib konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
ÜVEG		
E-üveg	72.000 – 80.000	Szálerősítésű betonok. A fib konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
AR-üveg (alkáliáknak ellenálló üveg)	78.000 – 80.000	
ÁSVÁNY		
Azbeszt szál	164.000	Szálerősítésű betonok. A fib konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
Szén szál (mesterséges)	150.000 – 300.000 illetve: 30.000 – 400.000	
Szilícium-karbid (SiC) szál	100.000 – 400.000	

Poisson-féle (haránt-alakváltozási)

tényező:

$$(\text{nü}) \quad \nu = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_h} = \frac{1}{m}$$

Poisson-féle szám:

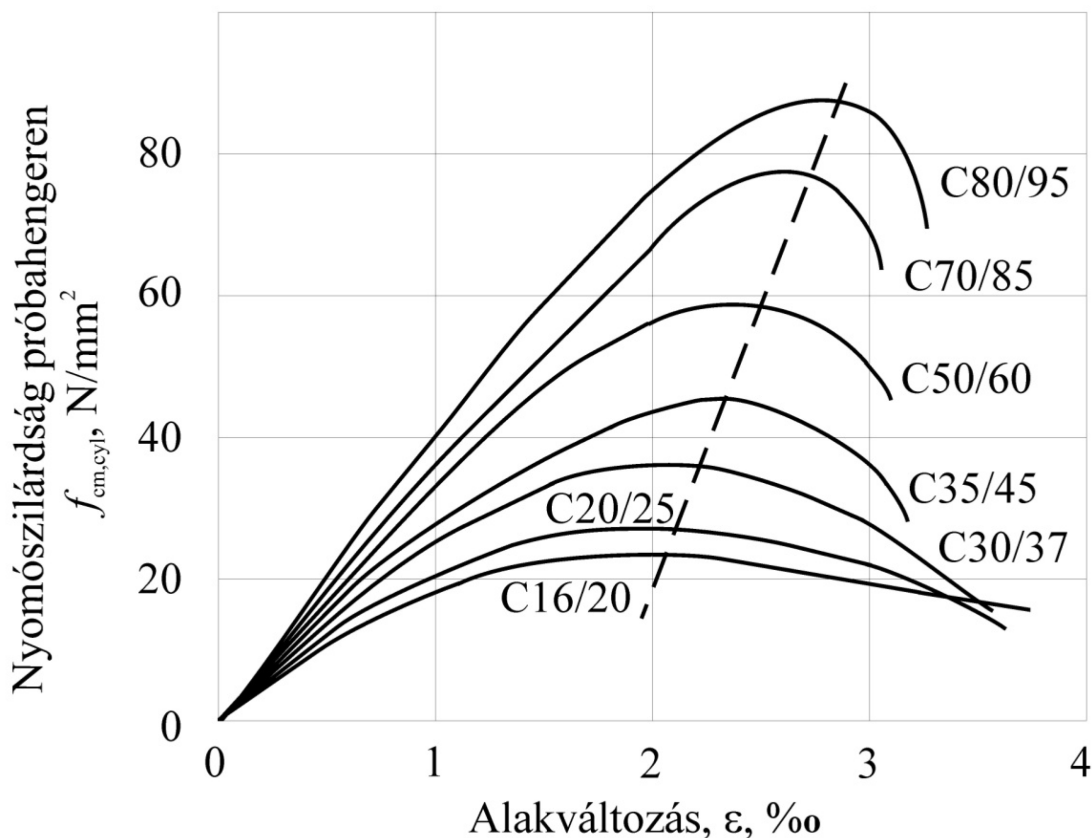
$$m = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_k} = \frac{1}{\nu}$$

	ν (Nü)
beton	0,167
üveg	0,245
acél	0,270
ólom	0,400
kaucsuk	0,500

ν = tart a 0,5-höz a folyadékok esetén és
ν = tart a zérushoz a nagyszilárdságú anyagok esetén

ε_k = keresztirányú fajlagos alakváltozás

ε_h = hosszirányú fajlagos alakváltozás



Összefüggés a beton nyomószilárdsági osztálya és a *σ–ε* görbe alakja között (*P. Grübl – H. Weigler – S. Karl*: „Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften" Ernst & Sohn. Berlin, 2001.)

A tehermentesítési rugalmassági modulus (E_b) valamely, a *σ–ε görb*e lineáris szakaszán kívül végzett tehermentesítés és újra terhelés folytán keletkező hiszterézis hurok felszálló ága érintőjének iránytangense az *σ–ε* görbe és a hurok metszéspontjában vagy a hiszterézis hurok átlója hajlásszögének iránytangense. Beton esetén az értékét a σ–ε görbe σ/σ_t = 0,3 vagy 0,6 relatív feszültséghez tartozó pontjában szokták meghatározni, ahol σ_t a törőszilárdságot (hasábszilárdságot) jelenti. A *σ–ε* görbe lineáris szakaszán belül azonos a kezdeti rugalmassági modulussal.

Az *érintő-modulus* (E_T) valamely, a *σ–ε görbe* lineáris szakaszán kívül eső – például $\sigma/\sigma_t = 0,6$ relatív feszültséget ébresztő – terhelési értéket megelőző és követő teherből számítható feszültségek különbségének és ezekhez a feszültségekhez tartozó alakváltozások különbségének a hányadosa, *σ–ε* görbe érintőjének iránytangese. A *σ–ε* görbe lineáris szakaszán belül azonos a kezdeti rugalmassági modulussal. A rugalmassági modulus egyik fajtája.

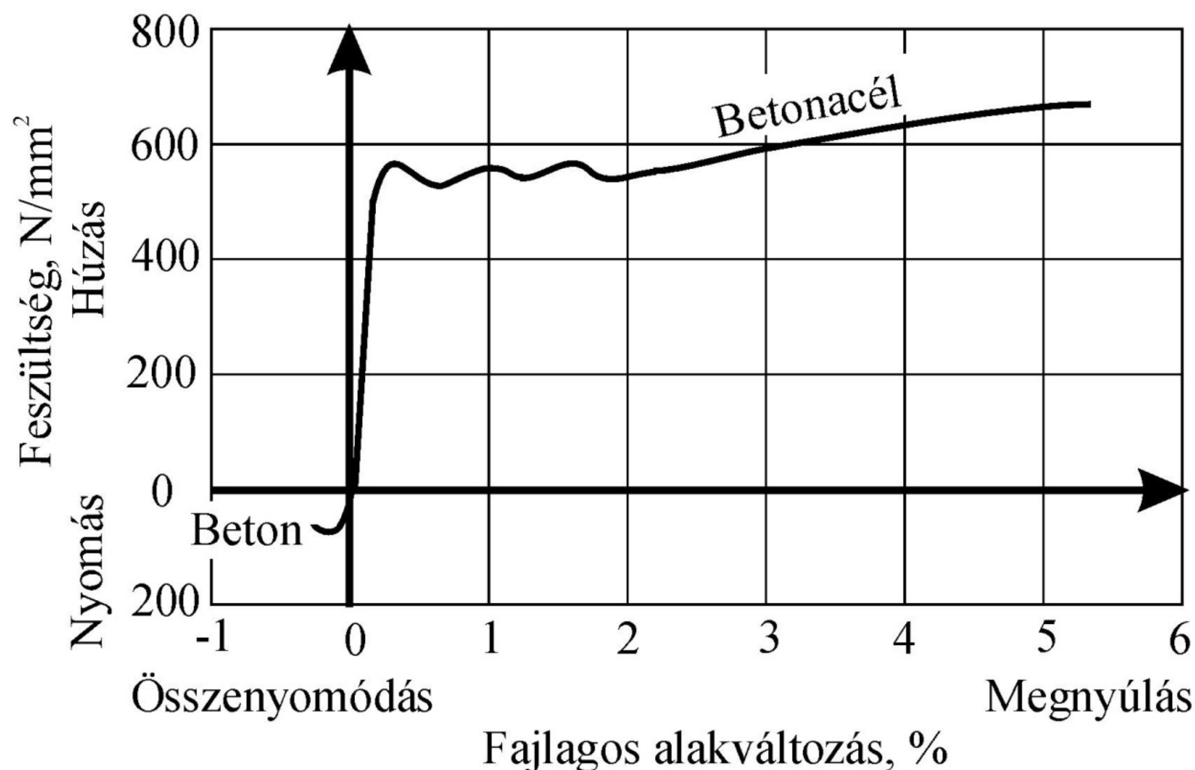
A *húr-modulus* (E_D) a *σ–ε görbe* valamely, a lineáris szakaszon kívül eső pontját és a koordinátarendszer $\varepsilon = 0$ és $\sigma = 0$ pontba helyezett origóját összekötő egyenes iránytangense. *Alakváltozási modulusnak* is nevezik ($E_{alakváltozási}$). Értékét beton esetén a *σ–ε görbe* $\sigma/\sigma_t = 0,6$ relatív feszültséghez tartozó pontjában szokták meghatározni. A *σ–ε* görbe lineáris szakaszán belül azonos a kezdeti rugalmassági modulussal. A rugalmassági modulus egyik fajtája. Angol megnevezése: secant modulus.

A nemzetközi és az európai szabványok a $\sigma/\sigma_t = 0,3$ relatív feszültséghez tartozó ponthoz tartozó *tehermentesítési rugalmassági modulust* – amelyet *húr-modulusnak* neveznek – tekintik a beton statikai (statikus) nyomási rugalmassági modulusának (MSZ ISO 6784:1993, MSZ EN 12390-13:2014, MSZ EN 13412:2007).

Kavicsbeton rugalmassági modulusa

(MSZ EN 1992-1-1:2010 szabvány 3.1. táblázata)

$f_{ck,cyl}$ [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{cm,cyl}$ [Mpa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$E_{cm,cyl}$ [Gpa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44



A beton és a melegen hengerelt betonacél σ–ε görbéjének viszonylagos elhelyezkedése

A beton ε_0 pillanatnyi alakváltozásának, ε_{zs} zsugorodásának és tartós terhelés okozta $\varepsilon_{kúszás}$ kúszásának együttesét a beton ε_t *tartós alakváltozásának* nevezzük:

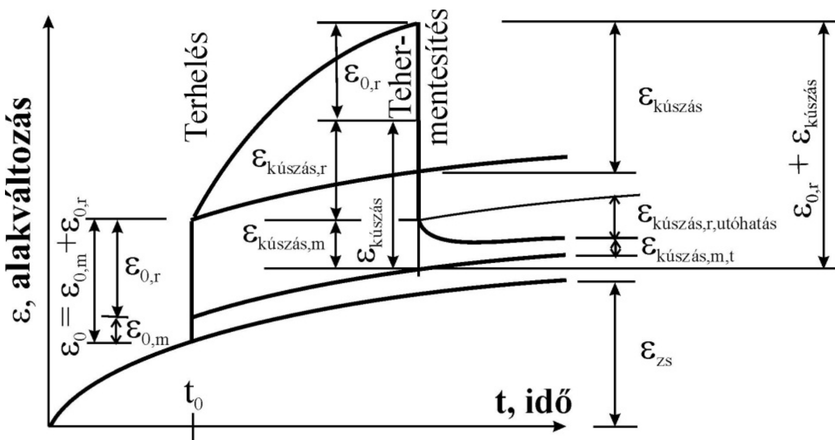
$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{kúszás}$$

A *138. ábrán* a kúszás folyamata látható az idő függvényében. Ha a megterhelt betont bizonyos idő elteltével tehermentesítjük, akkor az nem nyeri vissza eredeti alakját, mert a tartós alakváltozás (ε_t) egy része maradó alakváltozás ($\varepsilon_{t,m}$), amely a zsugorodásból (ε_{zs}), a terhelés okozta pillanatnyi alakváltozás (ε_0) maradó részéből ($\varepsilon_{0,m}$) és a kúszás maradó alakváltozásából ($\varepsilon_{kúszás,m}$) tevődik össze:

$$\varepsilon_{t,m} = \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{0,m} + \varepsilon_{kúszás,m}$$

Tehermentesítés után, az idő folyamán a kúszás maradó alakváltozásának egy része rugalmasan visszaalakul, – ezt a *kúszás rugalmas utóhatásának* nevezik ($\varepsilon_{kúszás,r,utóhatás}$) – ezért a *tartós alakváltozás maradó részének végértéke*:

$$\varepsilon_{t,m,\infty} = \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{0,m} + \varepsilon_{kúszás,\,m} - \varepsilon_{kúszás,\,r,\,utóhatás}$$



Kúszás

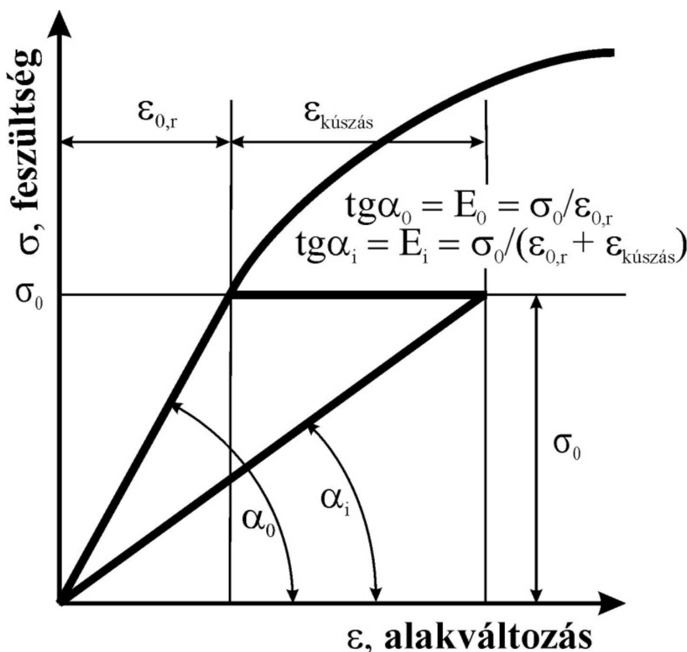
A kúszás kisebb tartós teher ($\leq 0{,}45 \cdot f_{ck,cyl}$) esetén a feszültséggel arányosnak tekinthető, és a kúszásra is érvényes a *Hooke*-féle törvény. Nagyobb tartós teher ($> 0{,}45 \cdot f_{ck,cyl}$) esetén a lineáristól való eltérést figyelembe kell venni (MSZ EN 1992-1-1:2010 szabvány 3.1.4. szakaszának (4) bekezdése).

Ha a kúszást lineárisnak tekintjük, akkor tartós terhelés esetén a feszültség–alakváltozás (σ–ε) diagramban az E_0 kezdeti rugalmassági modulus helyébe az E_i *ideális rugalmassági modulus* lép:

$$E_i = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{0,r} + \varepsilon_{kúszás}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{0,r}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{kúszás}}{\varepsilon_{0,r}}} = E_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi_t}$$

és

$$\sigma_0 = E_0 \cdot \varepsilon_{0,r} = E_i \cdot \left(\varepsilon_{0,r} + \varepsilon_{kúszás}\right)$$



Ideális rugalmassági modulus

A *kúszási tényező* vagy kúszási mérték (φ_t) a terhelés okozta pillanatnyi rugalmas alakváltozásra ($\varepsilon_{0,r}$) vonatkoztatott kúszással ($\varepsilon_{kúszás}$) egyenlő:

$$\varphi_t = \varepsilon_{kúszás} / \varepsilon_{0,r}$$

Az $1/(1+\varphi_t)$ tényező egynél kisebb szám, tehát a kúszás olyan folyamat, amely a rugalmassági modulust és például a hajlítási merevséget ($E_i \cdot I$) időben csökkenti – ahol *I* az inercianyomaték jele –, így a hajlított tartók időbeni lehajlását növeli, tehát kedvezőtlen jelenség.

Az MSZ 15022-1:1986 szabvány a C 10 – C 55 közötti beton nyomószilárdsági tartományban az *72. táblázat* szerinti kúszási tényező alapértékek (φ_0) alkalmazásával 7100–18900 N/mm^2 közötti E_i ideális beton rugalmassági modulussal (tartós teherhez tartozó E_b hatásos beton alakváltozási tényezővel) számolt, miközben e betonok E_{b0} kezdeti rugalmassági modulusát 24900 – 37800 N/mm^2 közötti értékben adta meg.

A kúszási tényező alapértéke a visszavont MSZ 15022 szabványsorozatban és az MSZ 15227 szabványban

Nyomószilárdsági osztály, MSZ 4719	C4	C6	C8	C10	C12	C16	C20
φ_0, kúszási tényező alapértéke, MSZ 15022	3,3	2,95	2,7	2,5	2,35	2,1	1,9
Kúszási tényező, MSZ 15227	–	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4

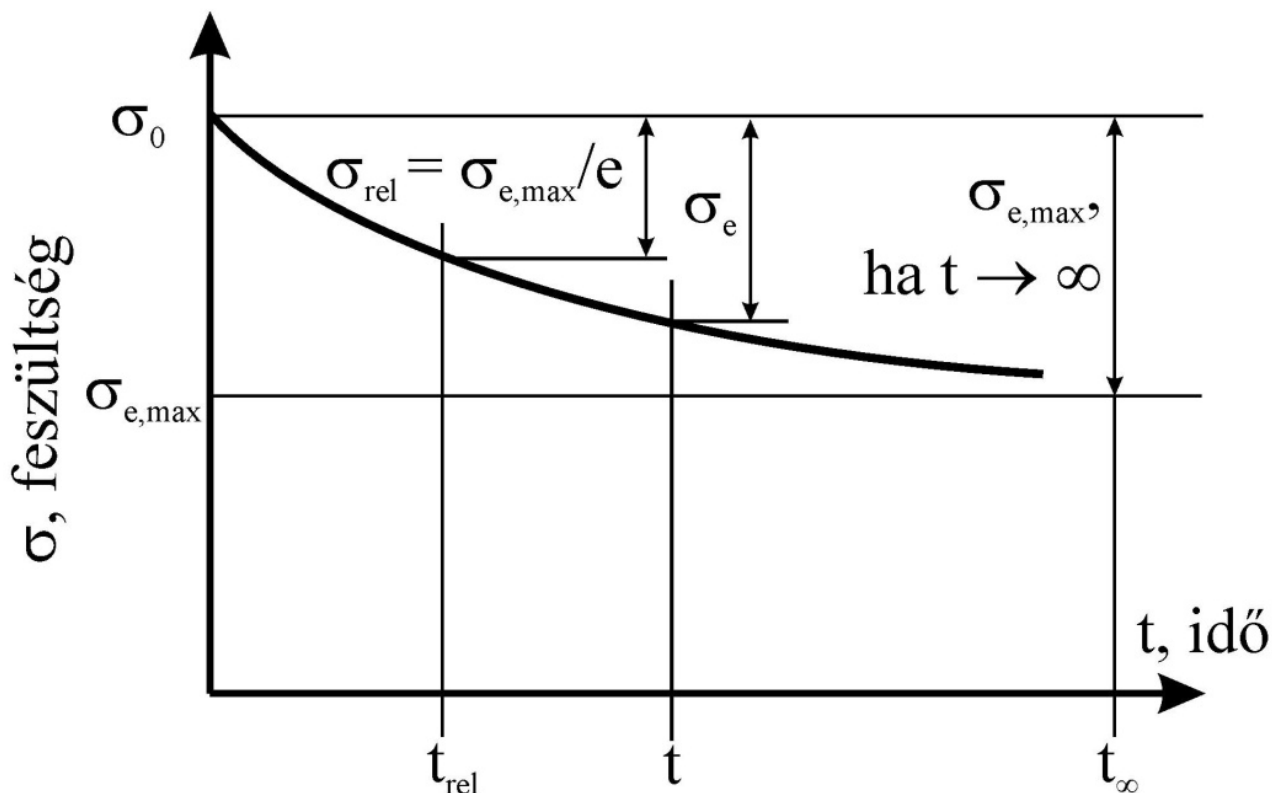
Nyomószilárdsági osztály, MSZ 4719	C25	C 30	C35	C40	C45	C50	C55
φ_0, kúszási tényező alapértéke, MSZ 15022	1,7	1,55	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
Kúszási tényező, MSZ 15227	1,2	1,0	–	–	–	–	–



A bal oldali fénykép a BME Építőanyagok Tanszékén, a jobb oldali fénykép az egykori SZIKKTI Betonosztályán készült valamikor az 1980-as években.

Ernyedés, relaxáció, feszültségveszteség. Feszítőacél ernyedése

Az ernyedés (σ_e) vagy más szóval relaxáció tulajdonképpen a kúszás „inverze”. Azt a feszültségcsökkenést – beton esetén nyomófeszültség-, feszítőacél esetén húzófeszültség-csökkenést – (ernyedést) jelenti, amely a tartós terhelés okozta alakváltozás (kúszás) állandó értéken tartásához szükséges. Azt az időt, amely alatt az ernyedés végértékének ($\sigma_{e,max}$) bizonyos hányada (σ_{rel}) bekövetkezik, ernyedési (relaxációs) időnek (t_{rel}) hívják, értéke igen nagy szám.



Ernyedés

(*Palotás* – *Balázs*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1980.)

HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK

ASTM C 39:2014	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
ASTM C 1231:2015	Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens
MSZ 4715-4:1972	A megszilárdult beton vizsgálata. Mechanikai tulajdonságok roncsolásos vizsgálata
MSZ 4719:1982	Betonok. Visszavont szabvány
MSZ 15022-1:1986	Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 1. rész: Vasbeton szerkezetek. Visszavont szabvány
MSZ 15022-2:1986	Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 2. rész: Feszített vasbeton szerkezetek. Visszavont szabvány
MSZ 15227:1980	Vízépítési műtárgyak vasbeton szerkezeteinek erőtani tervezése Visszavont szabvány
MSZ EN 1992-1-1:2010	Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok
MSZ EN 12390-3:2009	A megszilárdult beton vizsgálata. 3. rész: A próbatestek nyomószilárdsága
MSZ EN 12390-13:2014	A megszilárdult beton vizsgálata. 13. rész: A nyomási rugalmassági húrmodulus meghatározása
MSZ EN 13369:2013	Előregyártott betontermékek általános szabályai
MSZ EN 13412:2007	Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A nyomási rugalmassági modulus meghatározása
MSZ ISO 6784:1993	Beton. A statikus rugalmassági modulus meghatározása nyomásra. Visszavont szabvány